



基于物理模型试验法的双层扭王字块体 护面结构稳定性研究

刘辉，倪靖宇，于蕴泽

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司，上海 200120)

摘要：结合天津港某港区防波堤潜堤段工程设计变更项目，采用波浪断面物理模型试验方法对双层扭王字块体护面结构稳定性进行研究，并对断面进行优化，提出提高结构稳定性的相关建议措施。结果表明：对于堤身部位，上层单个块体稳定质量采用《防波堤与护岸设计规范》第4.3.7条的推荐公式及扭王字块体单层安放时的稳定系数 K_D 值所得的计算结果可满足结构稳定性要求；对于堤顶部位，当堤顶高程不超过设计高水位以上0.2倍设计波高时，上层单个块体质量至少应达到外坡上层护面块体质量的2倍方可满足结构稳定性要求；块体规则摆放，保持块体间紧密、勾连，可加强结构的防浪能力，提高结构稳定性。

关键词：双层扭王字块体；断面试验；稳定性

中图分类号：U 656.3

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)11-0074-07

Study on structural stability of double-layer twisted Wang block surface protection based on physical model test method

LIU Hui, NI Jing-yu, YU Yun-ze

(CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Combining with the engineering design modification project of the submerged section of a breakwater in a port area of Tianjin Port, we use the wave section physical model test method to study the structural stability of the double-layer twisted Wang block surface protection, optimize the cross-section, and propose some suggestions to improve the stability of structure. The results show that for the breakwater body, the stable mass of the upper single block is calculated by the recommended formula in Article 4.3.7 of *Code of Design for Breakwaters and Revetments* and the stability coefficient K_D value of the twisted Wang block placed in a single layer, the calculation results can meet the requirements of structural stability. For the top part of the breakwater, when the elevation of the top of the breakwater does not exceed 0.2 times the design wave height above the design high water level, the mass of a single upper block must reach twice the mass of the upper protective surface block of the outer slope to meet the structural stability requirements. The blocks are placed regularly to keep close and connected, which can strengthen the wave-proof ability of the structure and improve the stability of the structure.

Keywords: double-layer twisted Wang block; section test; stability

天津港某港区防波堤潜堤段(N1+500—N2+350)现已建成，堤顶高程为2.5 m。该海域设计高水位为4.3 m，故其较长时段淹没于水下。附近往来船只频繁，且部分船只不按规定航道行驶，船只搁

浅至潜堤上的状况时有发生，给安全通行带来严重隐患。因此拟采取相应措施对潜堤进行加高处理，防止上述状况发生。

双层扭王字块体作为一种新型护面结构形式

不仅可实现结构加高, 还具有不破坏原结构、施工方便、节省投资等优势, 且在国内类似工程中已有相关实践。高勇等^[1]采用该结构对某深水防波堤原护面结构形式进行优化调整, 加强其在恶劣海况下的稳定性和结构安全性, 堤顶高程也由 4.0 m 抬高至 5.3 m; 杨会利等^[2]采用以原受损护面块体为垫层, 在其上部安放更大的扭王字块体, 使原结构得到有效加固, 堤顶高程也随之抬高了 2.5 m; 张伟豪^[3]在原潜堤扭王字块护面的基础上, 采用增设削角扭王字块压顶并以 5~7 t 扭王字块护面及压肩的方式, 使潜堤堤顶交工验收高程由 -2.10~-0.30 m 抬升至 2.5~2.7 m。

综上可知, 双层扭王字块体护面结构确为潜堤加高可行之法, 但以往研究多集中于施工控制

措施、原块体作为垫层的适应性等方面, 对结构稳定性问题的分析不多。本文以天津港某港区防波堤潜堤段工程设计变更项目为例, 采用波浪断面物理模型试验的方法对该结构开展稳定性研究, 以期为同类工程设计提供参考与借鉴。

1 试验概况

1.1 试验水位

极端高水位为 5.88 m, 设计高水位为 4.30 m, 平均水位为 2.56 m, 设计低水位为 0.50 m, 极端低水位为 -1.29 m。

1.2 试验波浪要素

模型断面建造前, 在试验段布置波高仪进行入射波浪要素率定, 经率定后的实测试验波浪要素见表 1。

表 1 试验波浪要素率定结果

水位	位置	波向	波浪重现期/a	目标值			率定结果			偏差/%		
				$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	周期 T /s	$H_{1\%}/m$	$H_{13\%}/m$	周期 T /s	$H_{1\%}$	$H_{13\%}$	周期 T
极端高水位	外海侧	ENE 向	50	6.18	4.50	8.1	6.35	4.55	8.08	2.8	1.1	-0.2
				* 5.23	-	8.1	5.27	-	8.10	0.8	-	0
设计高水位	航道侧	SE 向	50	3.68	2.57	5.8	3.82	2.60	5.81	3.8	1.2	0.2
				* 3.04	-	5.8	3.10	-	5.80	2.0	-	0
平均水位	外海侧	ENE 向	50	6.06	4.46	8.1	6.31	4.48	8.09	4.1	0.4	-0.1
				* 5.15	-	8.1	5.22	-	8.10	1.4	-	0
设计低水位	航道侧	SE 向	50	3.62	2.55	5.8	3.79	2.55	5.82	4.7	0	0.3
				* 3.01	-	5.8	3.05	-	5.80	1.3	-	0
极端低水位	外海侧	ENE 向	50	6.06	4.46	8.1	6.31	4.47	8.10	4.1	0.2	0
				3.62	2.55	5.8	3.79	2.54	5.80	4.7	-0.4	0
航道侧	SE 向	50	5.92	4.44	8.1	6.02	4.45	8.08	1.7	0.2	-0.2	
				3.62	2.55	5.8	3.81	2.57	5.80	5.2	0.8	0
航道侧	SE 向	50	5.23	4.41	8.1	5.49	4.43	8.10	5.0	0.5	0	
				3.20	2.30	5.8	3.31	2.32	5.81	3.4	0.9	0.2

注: * 为规则波。

1.3 试验断面

双层扭王字块体作为一种新型护面结构, 目前规范中暂无相关条文规定, 故本试验堤身部位上层块体规格暂采用 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[4]第 4.3.7 条推荐公式及扭王字块体单层安放时的稳定系数 K_D 值所得计算结果(6 t)选取; 堤顶部位上层块体规格根据《防波堤与护岸设计规范》第 4.3.17 条规定: “堤顶块体的质量宜与

外坡块体相同。当堤顶高程在设计高水位以上不足 0.2 倍设计波高值时, 其质量不应小于外坡护面块体质量的 1.5 倍”选取, 即堤顶块体规格为 6 或 9 t。

综上, 本试验典型断面结构为: 潜堤原断面内外侧边坡均采用 6 t 扭王字块体护面, 变更断面在原断面护面块体基础上于堤身部位安放一层 6 t 扭王字块体, 堤顶部位安放一层 6 或 9 t

扭王字块。安放 6 或 9 t 扭王字块的断面堤顶高程分别为 4.29 或 4.52 m, 安放 6 或 9 t 扭王字块的堤顶宽度分别为 5.37 或 4.46 m, 内外边

坡坡度均为 1:1.75。由于红线限制, 双层扭王字块体护面结构仅在外海侧安放实施, 断面见图 1。

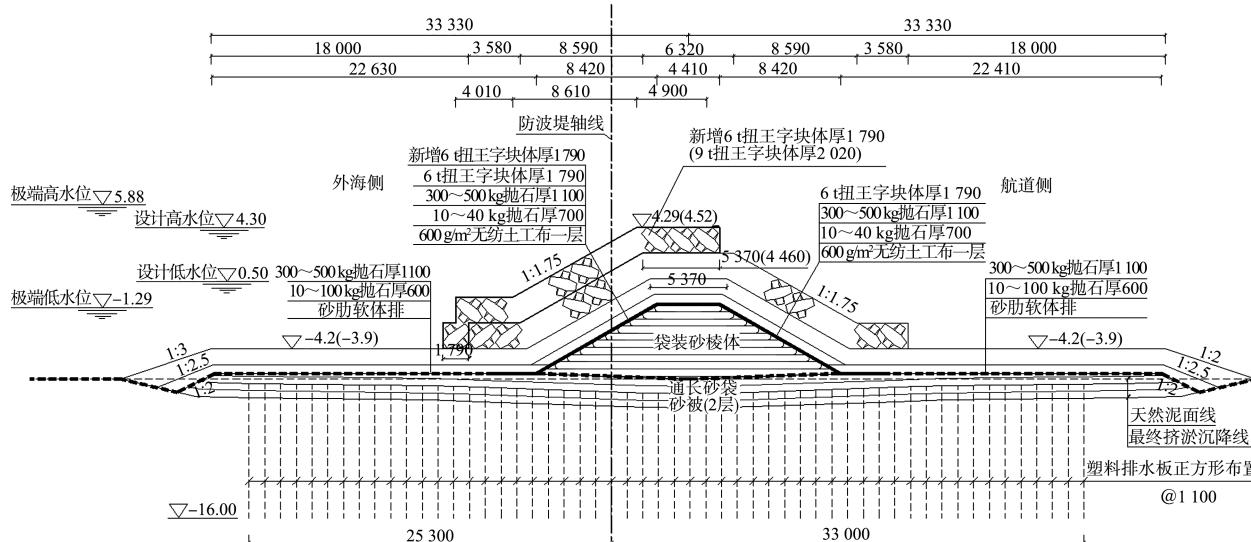


图 1 试验断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 物模试验

2.1 试验设备与测量仪器

本试验在长 175 m、宽 1.2 m、深 1.8 m 的水槽中进行, 该水槽可同时产生波浪、水流和风。水槽工作段沿纵向分割成两部分, 宽度均为 0.6 m, 其中一部分用于安放模型断面并进行模型试验, 另一部分用于扩散造波板的二次反射波。水槽一端配有消浪缓坡, 另一端配有推板式不规则波造波机, 由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。该造波系统可根据需要产生规则波和不同谱型的不规则波, 如图 2a) 所示。波要素采用电容式波高仪测量, 由计算机自动采集处理, 如图 2b) 所示。



a) 试验水槽



b) 波高仪

图 2 试验设备及测量仪器

2.2 试验方法

2.2.1 试验断面的模拟

模型中试验断面与原型保持几何相似, 各结构部分均按比尺缩小后进行制作, 模型误差不超过 1 mm。此外, 护面块体与原型保持质量相似。

2.2.2 波浪的模拟

试验分别采用规则波和不规则波进行, 以不规则波为主, 规则波作为对比。规则波采用 $H_{5\%}$ 波核核护面稳定性, 波浪按重力相似准则模拟, 不规则波波谱取 JONSWAP 谱。将按模型比尺换算后的特征波要素输入计算机, 产生造波讯号, 控制造波机产生相应的不规则波序列。每组试验不

规则波数量大于 120 个, 每组试验重复 3 次。

JONSWAP 谱形式:

$$S(w) = \frac{\alpha g^2}{w^5} \exp\left[-\frac{5}{4} \times \left(\frac{w_p}{w}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-\frac{(w-w_p)^2}{2\sigma^2 w_p^2}\right] \quad (1)$$

式中: $S(w)$ 为风浪频率; w 为频率; α 为无因次常数; w_p 为谱峰频率; γ 为谱峰升高因子, 取 3.3; σ 为峰形参数, $w \leq w_p$ 时 $\sigma=0.07$, $w > w_p$ 时 $\sigma=0.09$ 。

2.2.3 失稳判别标准

根据《波浪模型试验规程》^[5] 第 5.2.2 条规定, 当护面块体出现以下情况时判别为失稳: 1) 在波浪作用下, 随机抛放的护面块体累计位移超过单个块体的最大几何尺寸时即失稳, 强度起控制作用的大型护面块体, 其累计位移超过块体最大几何尺寸的一半时即失稳。2) 斜坡式建筑物抛石棱体和块石护底的表面明显变形即为失稳。

综上, 本试验中, 当增设的护面块体随机安放时, 单个块体累计位移须控制在其几何尺寸之

内; 当规则安放时, 单个块体累计位移需控制在其几何尺寸的一半。此外, 应保证整体结构不发生明显变形, 即满足整体稳定性。

2.3 模型设计

2.3.1 模型比尺设计

遵照《波浪模型试验规程》的规定, 采用正态模型, 按重力相似模型设计。根据结构物尺度、水深和波浪条件、场地设备条件, 模型比尺取 1:25。其他比尺为: 几何长度比尺 $\lambda_L = 25$, 时间比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{1/2}$, 重力比尺 $\lambda_g = \lambda_L^3$, 越浪量比尺 $\lambda_q = \lambda_L^{3/2}$ 。

2.3.2 模型设计

当堤顶扭王字块体规格为 6 t 时, 将块体在堤顶随机安放 3 排; 当堤顶扭王字块体规格为 9 t 时, 将块体在堤顶随机安放 2 排。

由于潜堤段内侧缺乏掩护, 受偏 S 向浪作用, 因此对本潜堤断面的内、外侧分别开展试验。试验断面共有 4 组, 见表 2。波要素见表 1 的率定结果。

表 2 试验断面形式

试验断面	堤身块体规格	堤顶块体规格	堤顶块体安放形式	波向
1	6 t 扭王字块体	6 t 扭王字块体	随机安放 3 排	ENE 向(外海侧)
2	6 t 扭王字块体	6 t 扭王字块体	随机安放 3 排	SE 向(航道侧)
3	6 t 扭王字块体	9 t 扭王字块体	随机安放 2 排	ENE 向(外海侧)
4	6 t 扭王字块体	9 t 扭王字块体	随机安放 2 排	SE 向(航道侧)

2.3.3 技术要求

1) 试验开始前将小波作用于模型断面一段时间, 以使堤身结构趋近密实, 然后再采用试验波浪要素进行试验, 观察护面块体的稳定性。

2) 观察试验断面各部位在波浪作用下的稳定性情况时, 每一种波况累计试验持续时间不得小于原型的 3 h。此外, 为保证试验结果的可靠性, 每组试验至少重复 3 次。当 3 次重复试验的试验结果差别较大时, 则增加重复次数, 每次试验均应重新铺放断面。

2.4 试验结果与分析

试验断面的稳定性试验结果见表 3。

表 3 试验断面的稳定性试验结果

试验断面	位置	极端高水位	设计高水位	平均水位	设计低水位	极端低水位
1	堤顶	失稳	失稳	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
2	堤顶	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
3	堤顶	稳定	失稳	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
4	堤顶	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定

试验断面 1 在极端高水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶 6 t 扭王字块掉落 1 个, 失稳,

见图 3a); 在设计高水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶 6 t 扭王字块掉落 1 个, 失稳, 见图 3b); 在其他各级水位及相应的不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 6 t 扭王字块均保持稳定; 在 $H_{5\%}$ 波高规则波的作用下, 6 t 扭王字块稳定情况与不规则波作用下情况相似。



a) 极端高水位+50 a—遇波浪

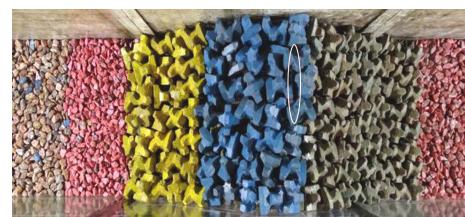


b) 设计高水位+50 a—遇波浪

图 3 断面 1 的试验现象

2) 试验断面 2 在各级水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶及堤身 6 t 扭王字块均保持稳定; 在 $H_{5\%}$ 波高规则波的作用下, 堤顶及堤身 6 t 扭王字块仍保持稳定。

3) 试验断面 3 在极端高水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶 9 t 扭王字块顶部有较大缝隙, 但满足稳定要求, 见图 4a); 在设计高水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶 9 t 扭王字块掉落 3 个, 失稳, 见图 4b); 在其他各级水位及相应的不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶 9 t 扭王字块及堤身 6 t 扭王字块均保持稳定; $H_{5\%}$ 波高规则波作用下, 堤顶 9 t 扭王字块及堤身 6 t 扭王字块稳定情况与不规则波作用下的情况相似。



a) 极端高水位+50 a—遇波浪



b) 设计高水位+50 a—遇波浪

图 4 断面 3 的试验现象

出现以上现象原因如下: 根据《港口与航道水文规范》^[6]关于波浪对建筑物的作用的相关规定及以往工程经验, 波浪对建筑物的作用主要集中在设计水位上下 1 倍波高范围内; 根据表 1, 极端高水位与设计高水位下的波高几乎相等; 在极端高水位下, 块体位于设计水位以下 1.36 m, 而在设计高水位下, 块体位于设计水位以上 0.22 m。综上, 相比于极端高水位, 设计高水位时块体所受波浪作用较大, 故出现极端高水位下堤顶块体仅出现较大缝隙, 但仍满足稳定判别标准, 而在设计高水位下出现块体滚落的情况。

4) 试验断面 4 在各级水位及相应的 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 堤顶 9 t 扭王字块及堤身 6 t 扭王字块均保持稳定; 在 $H_{5\%}$ 波高规则波的作用下, 堤顶 9 t 扭王字块及堤身 6 t 扭王字块仍保持稳定。

综上可知, 对于堤身部位, 采用 6 t 扭王字块对潜堤进行加高是可行的; 对于堤顶部位尚不满足结构稳定性要求, 需要对块体规格重新选取后进行优化设计。

2.5 模型优化设计

2.5.1 结构失稳原因分析

由试验结果可见, 受 ENE 向波浪影响, 在设计高水位及相应 50 a 一遇波浪作用下, 堤顶最后一排块体均会发生失稳, 这主要是在强烈的越浪

流作用下, 堤顶块体缺乏有效的支撑, 特别是较大的 9 t 扭王字块体无法与原断面 6 t 扭王字块体勾连, 稳定性更差。

考虑到本项工程是在已有工程上进行, 试图让每一个块体都能与原断面块体有效勾连非常困难。故提出优化方向如下: 1) 增加堤顶扭王字块体质量; 2) 将堤顶扭王字块体规则摆放, 自身形成一个勾连整体, 以提升堤顶块体的防浪能力。

2.5.2 模型优化设计

优化断面 1: 对堤顶 2 排 9 t 扭王字块体采用规则摆放, 堤身仍为 6 t 扭王字块体, 断面尺寸不

变, 通过模型试验观察结构稳定性情况。

优化断面 2: 若优化断面 1 仍不稳定, 堤顶采用 2 排 12 t 扭王字块体随机摆放, 堤身仍为 6 t 扭王字块体, 断面尺寸不变, 通过模型试验观察结构稳定性情况。

优化断面 3: 若优化断面 2 仍不稳定, 堤顶采用 2 排 12 t 扭王字块体规则摆放, 堤身仍为 6 t 扭王字块体, 断面尺寸不变。

考虑到结构整体稳定性, 当堤顶采用 2 排 12 t 扭王字块体时, 于外海侧堤脚处增设 1.1 m 厚规格为 300~500 kg 抛石, 见图 8。

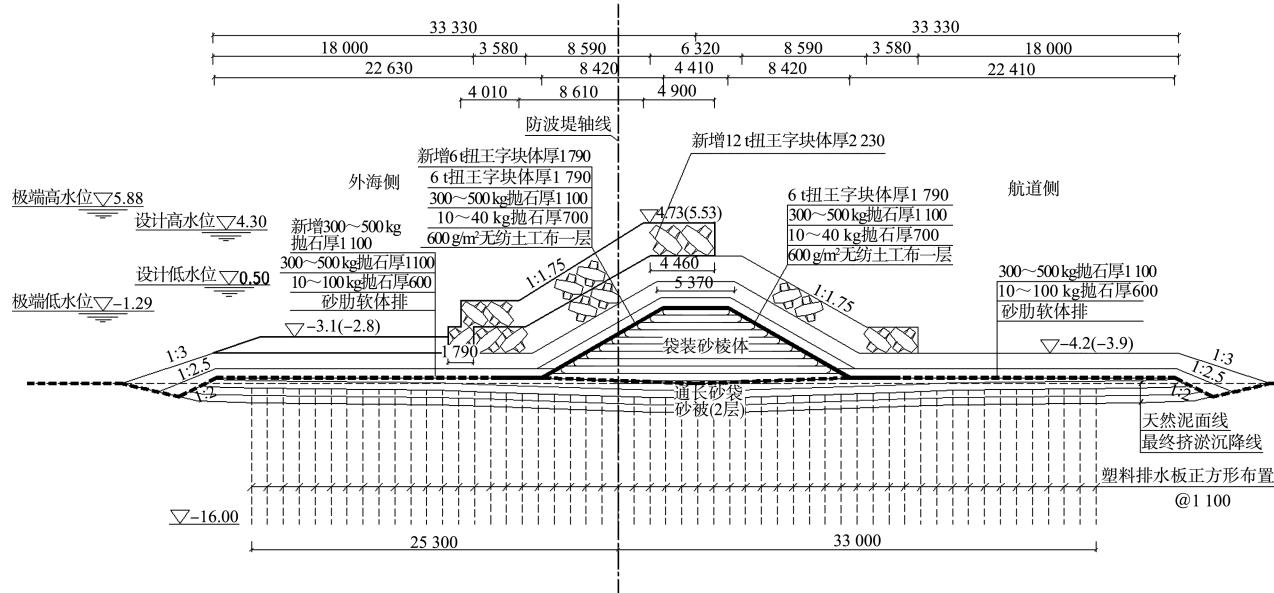


图 5 优化后的试验断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2.6 优化试验结果与分析

优化断面的稳定性试验结果见表 4。

表 4 优化断面的稳定性试验结果

优化断面	位置	极端高水位	设计高水位	平均水位	设计低水位	极端低水位
1	堤顶	稳定	失稳	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
2	堤顶	稳定	失稳	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
3	堤顶	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定
	堤身	稳定	稳定	稳定	稳定	稳定

优化断面 1 堤顶 2 排 9 t 扭王字块体在设计高水位及相应 50 a 一遇波浪作用下被冲落, 不能满足

稳定要求; 优化断面 2 堤顶 2 排 12 t 扭王字块体在设计高水位及相应 50 a 一遇波浪作用下仍被冲落, 不能满足稳定要求; 优化断面 3 在各级水位及相应 50 a 一遇不规则波作用下, 当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 外侧镇脚平台块石整体没有明显变形, 处于稳定状态, 坡面 6 t 扭王字块体和堤顶 12 t 扭王字块体均满足稳定要求, 见图 6。



a) 各级水位+外海侧50 a—遇波浪



b) 各级水位+航道侧50 a—遇波浪

图 6 优化断面 3 的试验现象

综上所述,当堤身采用 6 t 扭王字块体,堤顶采用 2 排规则摆放的 12 t 扭王字块体对潜堤进行加高可满足结构稳定性要求。

3 结论

1)对于堤身部位,在各级水位及相应波浪作用下,当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后,6 t 扭王字块体护面均未发生失稳,说明上层单个块体规格可采用《防波堤与护岸设计规范》第 4.3.7 条推荐的稳定质量公式及扭王字块体单层安放时的稳定系数 K_D 值进行计算。

2)对于堤顶部位,当采用 2 排 12 t 扭王字块体规则摆放时,在各级水位及相应波浪作用下,当波浪累计作用时间相当于原型的 3 h 后,护面块体均满足稳定要求,说明当堤顶高程不超过设计高水位以上 0.2 倍设计波高时,上层单个块体质量至少应达到外坡上层护面块体质量的 2 倍方可

(上接第 54 页)

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.
- [2] Civil Engineering and Building structures sector committee. maritime structures-Part 7: guide to the design and construction of breakwaters: BS 6349-7 [S]. London: Civil Engineering and Building Structures Sector Committee, 1991.
- [3] 彭志豪, 陈海燕, 周海芳. 一种带防浪板的桩基式防波堤结构[J]. 水运工程, 2016(3): 62-65.
- [4] 交通运输部天津水运工程科学研究所. Experimental study report on physical model of sediment [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.

满足结构稳定性要求。

3)同等试验条件下,堤顶块体规则摆放时结构保持稳定,随意摆放时失稳,说明依靠块体间的相互勾连作用可保护护面层的稳定。在施工时应注意块体摆放的规则程度,自身块体间保持紧密、勾连,同时尽量与原块体勾连,将新块体的脚尽可能插入原块体的缝隙中,以加强结构的防浪能力。

参考文献:

- [1] 高勇, 陈海龙. 双层扭王字块护面在深水防波堤结构中的应用[J]. 水运工程, 2020(8): 59-63, 90.
- [2] 杨会利, 刘海成, 陈汉宝. 扭王字块护岸破坏修复方法波浪稳定性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(4): 43-47.
- [3] 张伟豪. 拦沙堤施工高程确定方法[J]. 水运工程, 2007(2): 79-82.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] 南京水利科学研究院. 波浪模型试验规程: JTJ/T 234—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王璁)

- [5] 交通运输部天津水运工程科学研究所. Wave Numerical Study Report [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.
- [6] US Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100) [M]. Washington: US Army Corps of Engineers Press, 2006.
- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所. Experimental study report of 3D wave physical model test [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2019.
- [8] 汤子扬, 牛志国, 陈春燕. Plaxis 在板桩码头分析中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2013(1): 81-85.

(本文编辑 武亚庆)